

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0202 Energiatekniikan kandidaatintyö

Hukkalämmön muuttaminen sähköksi

Electricity from waste heat

Työn ohjaaja: Antti Uusitalo

Lappeenranta 8.5.2017

Hilla Kinnunen

TIIVISTELMÄ

Opiskelijan nimi: Hilla Kinnunen

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Opinnäytetyön ohjaaja: Antti Uusitalo

Hukkalämmön muuttaminen sähköksi

33 sivua, 10 kuvaa, 3 taulukkoa ja yksi liite

Hakusanat: hukkalämpö, ORC, Kalina-prosessi, suljettu Brayton-prosessi, ylikriittinen hiilidioksidi

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on määrittää teho- ja lämpötilatasot kolmelle hukkalämpöä sähköksi muuttavalla prosessille. Työssä tarkastellaan ORC- ja Kalina-prosessia, sekä suljettua Brayton-prosessia, jonka kiertoaineena on ylikriittinen hiilidioksidi. Hukkalämpöä hyödyntämällä parannetaan esimerkiksi teollisuuslaitosten energiatehokkuutta. Merkittäviä hukkalämmönlähteitä ovat moottori- ja kaasuturbiinivoimalaitokset ja sementti-, teräs- ja lasiteollisuus.

Kaikkien prosessien toimintaan vaikuttaa erityisesti kiertoaineen ominaisuudet. ORC-prosessi soveltuu hukkalämmön hyödyntämiseen, koska orgaanisten kiertoaineiden höyrystyslämpö on pienempi kuin veden, jolloin kiertoaineen lämpötila mukailee hyvin lämmönlähteen lämpötilaa. Kalina-prosessin etuna on kahdesta aineesta koostuva kiertoaine, jolloin höyrystyminen ei ole isoterminen prosessi. Hiilidioksidin paineen ja lämpötilan ollessa yli kriittisen pisteen kompressorin tekemä työ ei kasva yhtä voimakkaasti painesuhteen funktiona, kuin ideaalikaasun.

Kalina-prosessilla voidaan hyödyntää samoja hukkalämmönlähteitä, kuin ORC-prosessille. Näiden prosessien lämmönlähteiden lämpötilat ovat alhaisempia, kuin ylikriittistä hiilidioksidia kiertoaineena käyttävän Brayton-prosessin. Suljettu Brayton-prosessi, jossa kiertoaineena on ylikriittinen hiilidioksidi, ei ole vielä kaupallistunut toisin kuin ORC- ja Kalina-prosessit.

SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä	2
Lyhenneluettelo	4
1 Johdanto	5
2 Energianmuuntotavat	7
2.1 Organic Rankine Cycle	7
2.1.1 ORC-prosessin käyttö hukkalämmön hyödyntämisessä	10
2.2 Kalina-prosessi	12
2.3 Suljettu Brayton-prosessi ylikriittisellä hiilidioksidilla	16
3 Tekniikoiden eroavaisuudet	23
3.1 Teho- ja lämpötilatasot	23
3.2 Saatavuus ja kustannukset	26
4 Johtopäätökset ja yhteenvedo	28
Lähdeluettelo	30

LYHENNELUETTELO

Lyhenteet

CBC suljettu Brayton-prosessi (closed Brayton cycle)

ORC organic Rankine cycle

sCO₂ ylikriittinen hiilidioksidi (supercritical carbon dioxide)

1 JOHDANTO

Hukkalämmön hyödyntäminen energiantuotannossa on ilmastoystävällinen ja energian kallistuessa taloudellisesti kannattava ratkaisu. Valtoilla on kansallisia ja yhteisiä ilmasto- ja päästötavoitteita. Esimerkiksi Euroopan Unioni on asettanut energia- ja ilmastotavoitteet jäsenvaltioilleen. Vuoteen 2020 mennessä tavoitellaan 20 % vähennystä kasvihuonekaasupäästöissä vuoteen 1990 verrattuna, uusiutuvalla energialla katetaan 20 % energiankulutuksesta ja energiatehokkuutta nostetaan 20 %. (Euroopan Unioni 2017.) Energiatehokkuutta voidaan parantaa muuttamalla hukkalämpöä sähköksi. Motiva arvioi, että Suomessa teollisuuden käyttämästä energiasta syntyy hukkalämpöä 37 %. Teollisuudessa voitaisiin vähentää energiankulutuksesta aiheutuvia kustannuksia jopa 200 miljoonalla eurolla, jos hukkalämpö voitaisiin käyttää hyödyksi. (Motiva 2014.)

Hukkalämmön muuttaminen sähköksi -kandidaatintyö käsittelee sähköntuotantomahdollisuuksia ORC- ja Kalina-prosesseilla sekä suljetulla Brayton-prosessilla, jossa kiertoaineena on ylikriittinen hiilidioksidi. Organic Rankine cycle eli ORC-prosessi on Rankine-prosessi, jossa kiertoaineena toimii jokin orgaaninen aine (Minea 2014, 1). Kalina-prosessi on myös hyvin samanlainen kuin Rankine-prosessi, mutta siinä kiertoaineena käytetään veden ja ammoniakkin seosta (Saffari et al. 2015, 1). Kolmas käsiteltävä teknologia perustuu suljettuun Brayton-prosessiin, jossa kiertoaineena on ylikriittinen hiilidioksidi (Iverson et al. 2013). Nämä prosessit on valittu tarkasteltaviksi, koska kaikki soveltuvat hukkalämmön hyödyntämiseen. ORC- ja Kalina-prosessit ovat toiminnaltaan jokseenkin samanlaiset, joten niitä voidaan vertailla toisiinsa.

Työ koostuu kahdesta pääosiosta. Ensin käydään läpi työssä käsiteltävät prosessit. Prosessien toimintaperiaatteet käydään läpi erityisesti termodynamiikan kannalta. Kaikissa prosesseissa kiertoaineella on merkittävä rooli nimenomaan hukkalämmön hyödyntämistä ajatellen. ORC- ja Kalina-prosesseja vertaillaan tavalliseen Rankine-prosessiin, jossa kiertoaineena on vesi. Suljetussa Brayton-prosessissa voidaan käyttää hiilidioksidin sijasta ilmaa, joten hiilidioksidia käyttävää prosessia verrataan kaasuturbiiniin, jossa kiertoaineena on ilma. Työssä ei keskitytä laitosten komponenttien syvälliseen tarkasteluun, vaan nostetaan esiin prosessin toiminnan kannalta tärkeitä asioita.

Toinen osa keskittyy prosesseille sopivien toiminta-arvojen määrittelyyn. Kalina- ja ORC-prosessit ovat samankaltaisia, joten niiden toimintaa on vertailtu useissa julkaisuissa. Toisessa osassa käydään läpi aikaisemmin tehtyjä tutkimuksia ja niistä saatuja tuloksia, jotta saadaan muodostettua kaikille prosesseille sopivat lämpötila- ja tehotasot. Myös kaikkien prosessien kaupallisuutta ja saatavuutta arvioidaan löydettyjen lähteiden puitteissa.

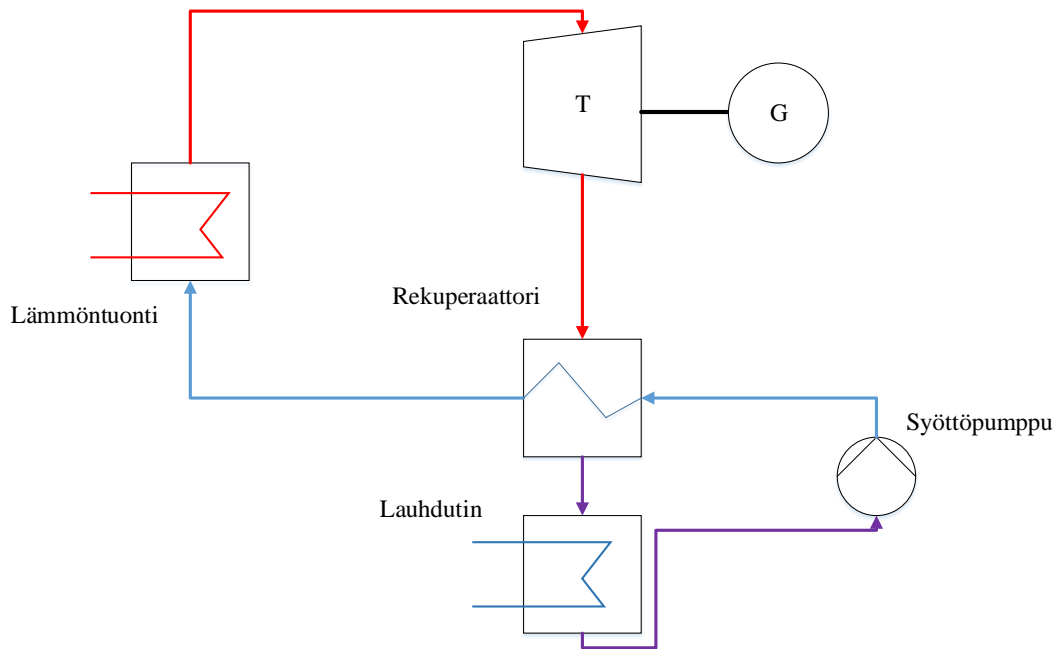
Työn tavoitteena on määrittää jokaiselle tekniikalle toimiva teho- ja lämpötilataso ja koota ne taulukoksi. Tarkoituksena ei ole määrittää prosesseille absoluuttisia raja-arvoja, vaan koota taulukko, joka antaa suuntaa prosessien sopivuudesta tietyille lämpötila- ja tehotasolle.

2 ENERGIANMUUNTOTAVAT

Tässä osiossa keskitytään ORC-, Kalina- ja suljettuun Brayton-prosessiin, jossa kiertoaineena on ylikriittinen hiilidioksidi. Kaikkia prosesseja käsitellään lähteiden pohjalta. Tekniikoita tarkastellessa keskitytään erityisesti siihen, miten kiertoaine vaikuttaa prosesseihin ja miten tekniikka soveltuu nimenomaan hukkalämmön hyödyntämiseen. Kaikilla prosesseilla voi olla useita eri lämmönlähteitä, mutta tarkastelu keskittyy eritoten hukkalämpöön sekä geotermiseen energiaan, joka on hukkalämmön tavoin usein matalassa lämpötilassa.

2.1 Organic Rankine Cycle

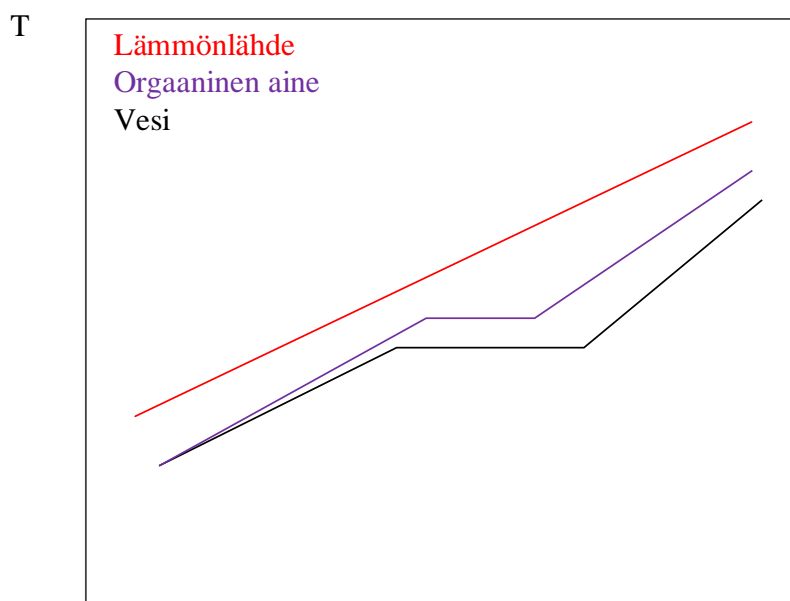
Organic Rankine Cycle (ORC) on Rankine-kiertoprosessi, jossa kiertoaineen käytetään veden sijasta jotakin orgaanista ainetta (kuva 1). Orgaaninen kiertoaine voidaan valita prosessin mukaan, mikä mahdollistaa ORC-prosessin käytön laajalla lämpötila- ja tehoalueella. ORC-prosessille sopivia lämmönlähteitä ovat geoterminen energia, hukkalämpö, bioenergia ja aurinkoenergia. (Colonna et al. 2015, 1.) ORC-prosessia voidaan käyttää sekä sähkön että lämmön tuotantoon, mutta tässä työssä keskitytään sähköä tuottavaan prosessiin. Tartiéren (2016) julkaisun mukaan vuonna 2016 ORC-voimaloiden asennettu sähköntuotanto kapasiteetti oli 2749,7 MW yhteensä 563 laitoksessa. Suurin osa näistä voimaloista käyttää lämmönlähteenä geotermistä energiaa. Hukkalämpöä hyödyntävien laitosten kapasiteetti on 12,7 % asennetusta ORC-voimaloiden kapasiteetista. (Tartiére 2016.) Tartiéren julkaisussa ei ole listattuna kaikkia käytössä olevia ORC-voimaloita, mutta se kertoo suuntaa antavan arvion vuonna 2016 asennetusta kapasiteetista.



Kuva 1. ORC-prosessilla voidaan tuottaa pelkästään sähköä, jolloin höyry lauhdutetaan lauhduttimessa (Colonna et al. 2015, 2). Punainen viiva kuvaa tulistunutta höyryä, violettä kylläistä höyryä tai nestettä ja sininen alijäähtynyttä nestettä.

Sähköä tuottavaan ORC-prosessiin kuuluu samoja komponentteja, kuin höyryvoimaproessiin. Kuvassa 1 (Colonna et al. 2015, 2) on yksinkertainen ORC-prosessin prosessikaavio. Sähköä tuotetaan generaattorilla, jota pyörittää turbiini. Turbiinissa tulistunut kiertoaine paisuu ja luovuttaa energiaa, joka muuttuu turbiinin akselin mekaaniseksi energiaksi. Ennen turbiinia kiertoaine höyrystetään ja tulistetaan höyrystimessä. Orgaaninen kiertoaine on usein turbiinin jälkeen tulistuneessa tilassa, jolloin tulistus poistetaan esilämmittämällä lauhdutuksen jälkeistä kiertoaainetta.

Kiertoaineen valinnalla on suuri merkitys ORC-prosessin toimintaan. Orgaaninen kiertoaine on matalan lämpötilan sovelluksissa parempi vaihtoehto kuin vesi, koska höyrystymislämpötila on pienempi. Pienemmällä höyrystymislämpötilalla kiertoaineen lämpötila pysyy lähellä lämmönlähteen lämpötilaa, kuten kuvassa 2 esitetään. (Heinimö & Jäppinen 2005, 12.)



Kuva 2. Veden lämpötilan muutos on alhaisempi, kuin orgaanisen kiertoaineen, koska veden höyrystyslämpö on suurempi (Heinimö & Jäppinen 2005, 12).

Kiertoaineena käytetään kloorattuja ja halogenoituja hiilivetyjä, puhtaita hiilivetyjä tai sellaisia, joissa hiilivety on osittain korvattu. Myös erilaiset silikoniöljyt ovat yleisesti käytettyjä. Hukkalämpöä hyödyntävissä prosesseissa tai geotermisissä voimalaitoksissa, joissa lämpötila jää alle 200 °C, käytetään usein n-pentaania. Silikoniöljyt ovat tyypillisiä prosesseissa, joissa lämpötila on korkeintaan 280 °C. Tolueenia voidaan käyttää jopa 350 °C lämpötilassa. (Heinimö & Jäppinen 2005, 19.) Taulukossa 1 vertaillaan n-pentaanin ja veden ominaisuuksia 25 °C lämpötilassa ja ilmakehän paineessa.

Taulukko 1. n-Pentaanin arvot ovat Heinimön ja Jäppisen (2005, 19) taulukosta ja veden arvot ovat The Engineering Toolbox –verkkosivulta.

	n-Pentaani	Vesi
Molekyylikaava	C ₅ H ₁₂	H ₂ O
Tiheys [kg/m ³]	630	1000
Kiehumispiste [°C]	36	100
Ominaislämpökapasiteetti [kJ/kg°C]	2,32	4,19
Höyrystyslämpö [kJ/kg]	366	2257

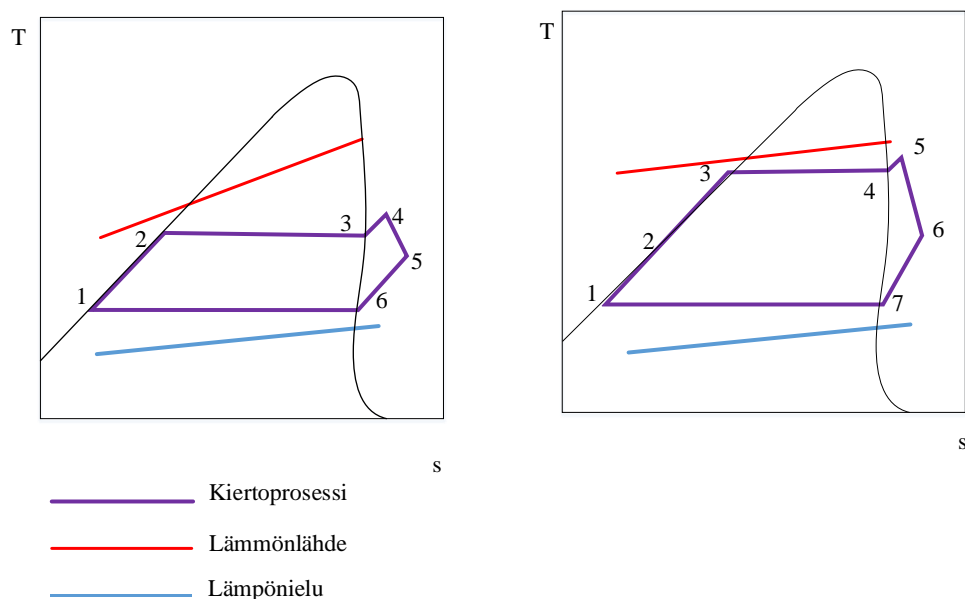
Taulukosta 1 nähdään, että n-pentaanin höyrystyslämpö ja ominaislämpökapasiteetti ovat alhaisemmat kuin vedellä. Kun ominaislämpökapasiteetti on pienempi, kiertoaineen lämpötila muuttuu nopeammin. Kuvasta 2 nähdään, että orgaanisen kiertoaineen

lämpötila nousee nopeammin lähelle lämmönlähteen lämpötilaa kuin veden. Alhainen höyrystyslämpö näkyy kuvassa 2 lyhyempänä vaakasuorana eli isotermisenä vaiheena.

Kiertoaineen valinnassa täytyy ottaa huomioon aineen termodynaamiset ominaisuudet. Kiertoaineen halutaan usein seuraavan mahdollisimman tarkasti lämmönlähteen lämpötilaa. Kun höyrystyslämpö on pieni, kiertoaineen lämpötila ehtii nousta lähelle lämmönlähteen lämpötilaa. Myös aineen kriittisen lämpötilan pitää olla prosessille sopiva. Pieni höyrystyslämpö usein takaa myös tulistumisen lämmönvaihtimessa ennen turbiinia. Jos kiertoaine on kylläisessä tilassa turbiiniin mennessä, turbiinissa muodostuu pisaroita, jotka aiheuttavat kulumista siipiin. Jos kiertoaine on tulistunutta ulostulossa, se voidaan poistaa esilämmittämällä höyrystimeen menevää nestemäistä kiertoainetta rekuperaattorissa. Höyryn tiheys on oltava riittävän suuri, jotta lauhduttimen ja höyrystimen koko on mahdollisimman pieni. Myös kiertoaineen myrkyttömyys ja kemiallisen stabiilitetti on otettava huomioon. (Lemort & Quoilin 2009, 6).

2.1.1 ORC-prosessin käyttö hukkalämmön hyödyntämisessä

Jotta hukkalämmöstä saadaan hyödynnettyä mahdollisimman suuri osa, halutaan lämmönlähteen lämpötilan muuttuvan mahdollisimman paljon (kuva 3). ORC-prosessissa, jonka lämmönlähde on hukkalämpö, ei yleensä ole esilämmitystä. Ilman esilämmitystä saadaan suurempi lämpötilaero lämmönlähteeseen. Hukkalämpöä hyödyntävässä prosessissa kiertoaineen lämpötilataso jää alemmaksi, kuin CHP- (combined heat and power) tai aurinkovoimalaitoksessa. (Lemort & Quoilin 2009, 8.)



Kuva 3. Vasen kuva kuvaa tyypillistä hukkalämpöä hyödyntävää ORC-prosessia T, s -koordinaatistossa. Oikeanpuolinen kuva esittää CHP-laitoksessa käytettävää ORC-prosessia, jossa on mukana tulistuksen poisto. (Lemort & Quoilin 2009, 8.)

Kuvassa 3 (Lemort & Quoilin 2009, 8) esitetään hukkalämpöä hyödyntävä ORC-prosessi, sekä CHP- tai aurinkovoimalaitokseen yhdistetty prosessi. Hukkalämpöä hyödyntävässä prosessissa pisteiden 1 ja 2 välillä kiertoaine on nestefaasissa ja sen lämpötila nousee vakioaineessa. Pisteiden 2 ja 3 välillä kiertoaine höyrystyy ja pisteeseen 4 mennessä tulistuu. Lemortin ja Quoilin (2009, 8) mukaan hukkalämpöä hyödyntävässä laitoksessa ei yleensä ole erillistä tulistuksen poistoa rekuperaattorissa. Kuten kuvasta 3 nähdään, lämmönlähteen lämpötila laskee huomattavasti voimakkaammin hukkalämpöä hyödyntävässä prosessissa kuin oikean puoleisessa prosessissa.

Pisteiden 4 ja 5 välillä vasemman puoleisessa kuvassa ja pisteiden 5 ja 6 välillä oikean puoleisessa kuvassa kiertoaine paisuu turbiinissa tai muussa paisuntakoneessa. Paisunnan jälkeen hukkalämpöä hyödyntävässä prosessissa tulistus poistuu lauhduttimessa, jossa höyry myös lauhtuu ja palaa pisteeseen 1. Oikean puoleisessa prosessissa pisteiden 6 ja 7 välillä tapahtuva tulistuksen poisto esilämmittää kiertoainetta ja aiheuttaa lämpötilan nousun pisteiden 1 ja 2 välillä.

Lemortin ja Quoilin (2009, 8–9) mukaan hukkalämmöntalteenotossa ei päästä yhtä suuriin ORC-prosessin hyötysuhteisiin kuin CHP- tai aurinkovoimalaan yhdistetyssä

prosessissa, jos prosessiin ei sisällytetä rekuperaattoria. Esilämmitys nostaa lämmönvaihtimeen menevän kiertoaineen lämpötilaa, jolloin lämmönlähteen lämpötila on korkeampi lämmönvaihtimen jälkeen. Lämmönlähteen lämpötila ei muutu yhtä paljon, koska lämpötilaero lämmönlähteen ja kiertoaineen välillä on pienempi. Hukkalämpöä hyödyntävässä prosessissa ei pitäisi optimoida kokonaishyötysuhdetta, vaan ulos saatavaa tehoa (Lemort & Quoilin 2009, 9). Lämmönlähteestä poistuva lämpöteho riippuu lämpötilanmuutoksesta. Jos mekaaniset häviöt ja massavirrat pysyvät vakioina, prosessista saatava teho on sitä suurempi, mitä enemmän lämmönlähteestä siirretään lämpötehoa prosessiin.

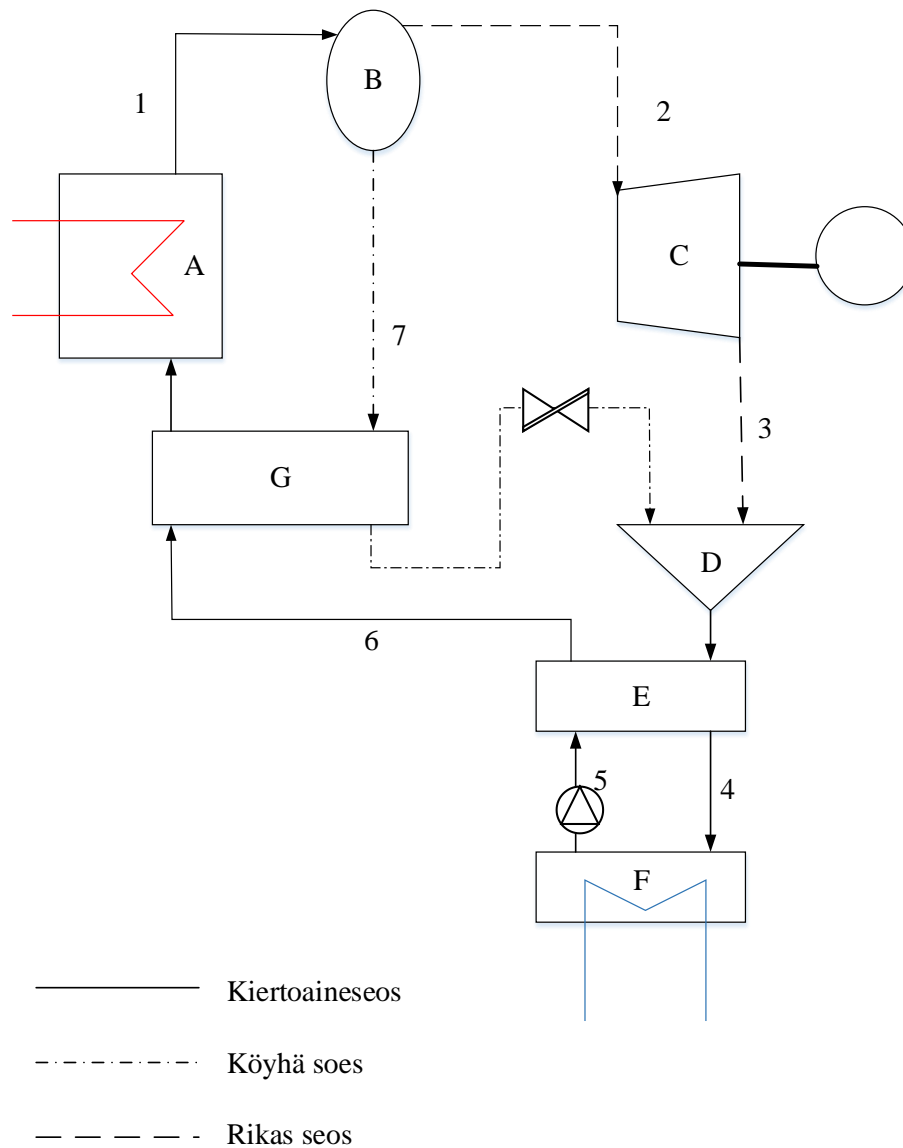
Ensimmäinen teollisuuden hukkalämpöä hyödyntävä ORC-voimalaitos rakennettiin 1998 Saksaan sementtitehtaan yhteyteen. Tämä voimalaitos tuottaa parhaimmillaan 1,5 MW sähkö ja lämmönlähteen lämpötila vaihtelee välillä 180–340 °C. Monet sementtitehtaiden yhteyteen rakennetut ORC-prosessit ovat melko standardisoituja. (Colonna et al. 11.) Campana et al. (2013, 6) arvio, että terästeollisuuden hukkalämmönhyödyntämisessä ORC-voimalan tuottaman tehon potentiaali olisi jopa 748 MW. Terästeollisuudessa ORC-prosessia voidaan käyttää esimerkiksi valokaari sulattamon savukaasujen lämmön hyödyntämiseen. Hukkalämmön lämpötila voi vaihdella jopa välillä 150–1600 °C. Julkaisussa arvioidaan karkeasti myös lasiteollisuuden ORC-potentiaaliksi 78,5 MW ja maakaasuun siirtoon liittyvän energiansäästön ORC-potentiaaliksi 1304 MW EU27-maissa. (Campana et al. 2013, 5–8). Vuonna 2016 suurin osa, 66,8 % kapasiteetista eli 233 MW_e, hukkalämpöä hyödyntävistä ORC-voimaloista käytti dieselmoottorin tai kaasuturbiinin hukkalämpöä. Sementti- ja kalkkiteollisuuden yhteydessä ORC-voimaloiden asennettu kapasiteetti oli samana vuonna 29 MW_e. (Tartière 2016.)

2.2 Kalina-prosessi

Kalina-prosessi muistuttaa tavallista Rankine-prosessia. Kiertoaineena veden sijasta on ammoniakki ja veden seos. Kahdesta fluidista koostuvan kiertoaineen komponentit höyrystyvät ja lauhtuvat eri pisteessä. Höyrystimessä ammoniakki höyrystyy ennen vettä. Kiertoaineen lämpötila mukaillee paremmin lämmönlähteen lämpötilaa, kuin yhdestä fluidista koostuvan kiertoaineen lämpötila. (He, Zhang & Zhang 2012, 2.) Höyrystyminen ja lauhtuminen eivät ole Kalina-prosessissa isotermisiä, toisin kuin ORC- tai perinteisessä

Rankine-prosessissa, joissa kiertoaineena on yksi fluidi. Kalina-prosessissa voimalaitoksen rakenne on kuitenkin monimutkaisempi, koska prosessi vaatii useampia komponentteja. (Victor, Kim & Smith 2013, 1–2.)

Kuva 4 esittää KCS-11 Kalina-prosessin virtauskaaviota (Fallah et al. 2015). Kalinaprosesseja on kehitetty erilaisiin käyttökohteisiin, mutta KCS-11 prosessi sopii sähköntuotantoon, kun lämmönlähde on matalassa lämpötilassa (Yari et al. 2015, 2).



Kuva 4. KCS 11 kalinaprosessin virtauskaavio, jossa A on lämmöntuonti, B höyryn ja kosteuden erotin, C turbiini, D kostean höyryn kokoaja, E matalapaine esilämmitin, F lauhdutin ja G korkeapaine-esilämmitin (Fallah et al. 2015).

Lämmöntuonnin jälkeen (1) höyrystyneestä ammoniakkin ja veden seoksesta muodostunut kiertoaine viedään höyryn ja nesteen erottimeen. Siinä kiertoaineen kosteus erotetaan höyrystä, jotta turbiiniin ei mene nestepisaroita. Turbiinin jälkeen (3) kiertoaine menee kostean höyryn kokoajaan, johon tuodaan kiertoaine turbiinista ja neste (7) korkeapaine-erilämmittimen jälkeen. Nesteen painetta lasketaan venttiilin avulla. Kiertoaine johdetaan matalapaine-esilämmittimen jälkeen lauhduttimeen, jossa lämpönielu lauhduttaa kiertoaineen takaisin nesteeksi. Paineistettu nestefaasinen kiertoaine (5) esilämmitetään matalapaine- ja korkeapaine-esilämmittimissä ja johdetaan höyrystimeen, jossa lämmönlähde höyrystää ensin ammoniakkin matalammassa lämpötilassa ja veden korkeammassa.

Kalina-prosessi on höyryvoimaproessia parempi vaihtoehto, kun lämmönlähteen lämpötila on alle 537 °C. Korkeimmissa lämpötiloissa Kalina-prosessi ei ole tavallista Rankine-prosessia parempi. Hukkalämpöä hyödyntävissä sekundääriprosessissa Kalina prosessin hyötysuhde voi olla jopa 10–20 % tavallista höyryvoimaproessia parempi. (He, Zhang & Zhang 2012, 3.) Jonsson (2003) tutki tohtorinväitöskirjassaan Kalina-prosessia yhdistettynä kaasun- ja diesel-kaasumoottoriin ja vertasi sitä samaan laitteistoon liitettyyn Rankine-prosessiin. Yhtä Kalina-prosessia lukuun ottamatta kaikilla Kalina-systeemeillä saavutettiin parempi hyötysuhde ja suurempi teho, kuin vesikiertoisella höyryvoimaprosesseilla. (He, Zhang & Zhang 2012, 3.)

Kalinaproessia optimoidaan muutaman tärkeän parametrin avulla: kaasun ja nesteen erottimen lämpötila, turbiinin sisäänmenolämpötila ja -paine, sekä turbiinin ulostulon paine. Prosessin hyötysuhde kasvaa maksimiarvoonsa, jos turbiinin massavirta pidetään vakiona, ja nostetaan erottimen lämpötilaa. Jos sekä massavirta, että lämpötila pidetään vakiona, hyötysuhde kasvaa erottimen paineen laskiessa. Jos paine- ja lämpötilaeroa turbiinin sisäänmenon ja ulostulon välillä kasvatetaan, hyötysuhde paranee. Myös ammoniakkin massavirtaa kasvattamalla parannetaan hyötysuhdetta. (He, Zhang & Zhang 2012, 4.)

Kahdesta fluidista koostuvalla kiertoaineella saavutetaan useita hyötyjä yhteen fluidiin verrattuna. Hukkalämmön hyödyntämiseen ammoniakki on sopiva kiertoaine, koska se höyrystyy jo matalassa lämpötilassa. Kun seoksen konsentraatioita muutetaan prosessin aikana, saadaan rikasammoniakkinen seos höyrystimeen ja köyhä seos matalapaineiseen

lauhduttimeen. Kuten aikaisemmin on mainittu, kaksifaasisen seoksen lämpötila noudattaa paremmin lämmönlähteen lämpötilaa, jolloin lämpöhäviöt jäävät mahdollisimman vähäisiksi. Ammoniakkikonsentraation pienentyessä nesteen höyrystymislämpötila nousee, joten höyrystyminen ei ole isoterminen prosessi. Ammoniakin moolimassa on lähes sama, kuin vedellä, joten ammoniakkikaasu on verrattavissa vesihöyryyn. Kalinaprosessin turbiinina voidaan käyttää tavallisia standardoituja höyryturbiineja, kunhan materiaali on korroosion kestävä. (He, Zhang & Zhang 2012, 7.)

Lu et al. (2009) mukaan Kalina-prosessilla saavutetaan korkeampi kokonaishyötysuhde kuin ORC-prosessilla, koska lämmönsiirron hyötysuhde on korkea ja lämpönieluun siirtyä mahdollisimman vähän energiaa. Kalina-prosessi ei kuitenkaan ole kaikkein toimivin vaihtoehto, kun lämpötilatasot ovat korkeat, mutta tehotaso pieni. Kalinaprosessi vaatii monimutkaisen laitoksen, suuren lämmönsiirtopinta-alan, korkean painetason ja korroosion kestävän materiaalin. Hyvin suunniteltu ORC-prosessi on toiminta-arvoiltaan lähes yhtä hyvä. (He, Zhang & Zhang 2012, 3.) ORC-prosessi on tässä tilanteessa parempi vaihtoehto, koska laitoksen rakenne on yksinkertaisempi, jolloin investointikustannus on pienempi. Jos kiertoaine on valittu hyvin ja se on kemiallisesti stabiilia, laitoksen materiaalien ei tarvitse olla yhtä hyvin korroosiota kestäväää kuin ammoniakki-vesiseoksen ollessa kiertoaineena.

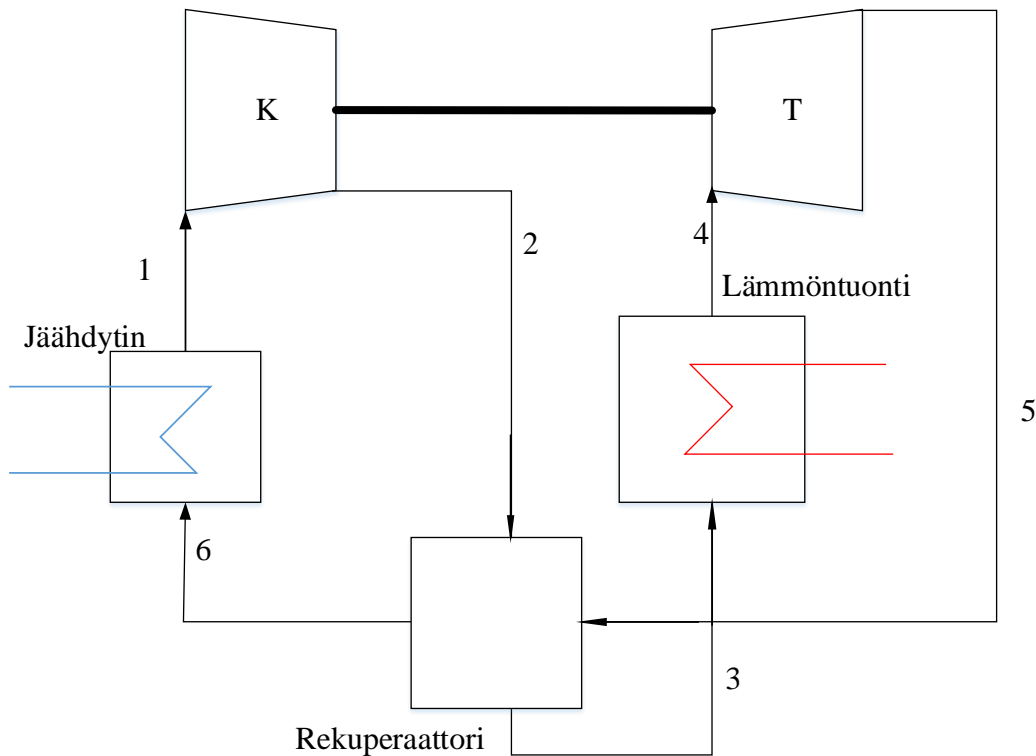
Fallah et al. (2015, 2) on koonnut artikkelissaan taulukoksi eri tutkimuksista saatuja tietoja, kun Kalinaprosessia on vertailtu ORC-prosessiin ja yhdessä tutkimuksessa transkriittiseen kaasuturbiiniprosessiin. Kaikissa tutkimuksissa turbiinin sisäänmenolämpötila on 80–132,6 °C. Paine turbiinin sisäänmenossa 9–50 bar. Hettiarachchi et al. sai tutkimuksensa tulokseksi, että Kalinaprosessilla saavutetaan korkeampi terminen hyötysuhde, 8,7 %, kun turbiinin sisäänmenopaine on 25 bar ja lämpötila 90 °C. Guzović et al. ei saanut tutkimuksessaan kovin suurta ero ORC- ja Kalina-prosessin välille, kun lämmönlähteenä oli alle 180 °C geoterminen lämmönlähde. ORC-prosessi toimii kuitenkin hieman paremmin keskisuurella lämpötila-alueella, kun taas kalinaprosessin toiminta-arvot olivat paremmat matalalla lämpötilalla. (Fallah et al. 2015, 2.)

Fallahin (2015, 2) kokoaman taulukon perusteella voidaan päätellä, että Kalina-prosessi on termodynaamisesti parempi vaihtoehto, kun halutaan hyödyntää matalan lämpötilan lämmönlähdettä. Taulukossa ei oteta kantaa kustannuksiin tai prosessissa tapahtuviin lämpöhäviöihin. Kalina- ja ORC-prosessien vertailu perustuu monesti teoreettiseen laskentaan ja eri simulointimalleihin, joissa ei välttämättä oteta lämpöhäviöitä huomioon. Kalina-prosessi on ORC-prosessia monimutkaisempi rakenteeltaan ja sisältää useampia komponentteja. Todellisuudessa mikään komponenteista ei ole täysin lämpöeristetty, joten Kalina-voimalaitoksessa voi tapahtua enemmän lämpöhäviöitä, kuin ORC-voimalaitoksessa.

2.3 Suljettu Brayton-prosessi ylikriittisellä hiilidioksidilla.

Suljettu Brayton-prosessi (closed Brayton cycle, CBC), on suljettu kaasuturbiiniproessi, jossa kiertoaaineena on hiilidioksidi. Kiertoaine on koko prosessin ajan ylikriittinen, mikä hiilidioksidilla tarkoittaa yli 30,98 °C lämpötilaa ja 73,8 bar painetta. Ylikriittistä hiilidioksidia (sCO₂) käytettäessä laitteistosta saadaan kompaktin kokoinen ja terminen hyötysuhde on korkeampi kuin tavallisen Rankine-prosessin, kun turbiinin sisäänmenolämpötila on yli 500 °C. (Cho et al. 2015, 1.)

Suljetussa Brayton-prosessissa kiertoaaine puristetaan korkeampaan paineeseen ja lämmöntuonnin jälkeen paisutetaan takaisin kompressorin sisäänmenopaineeseen. Prosessi voi sisältää myös useita vaiheita, joissa puristetaan tai paisutetaan kiertoainetta uudestaan, tai jäähdytys voi tapahtua useamman lämmönvaihtimen kautta. Kuvassa 5 on yksinkertainen suljettu Brayton-prosessi.



Kuva 5. Suljetussa Brayton prosessissa kiertoaaine paineistetaan kompressorissa, ja kuumennettu kiertoaaine paisuu turbiinissa.

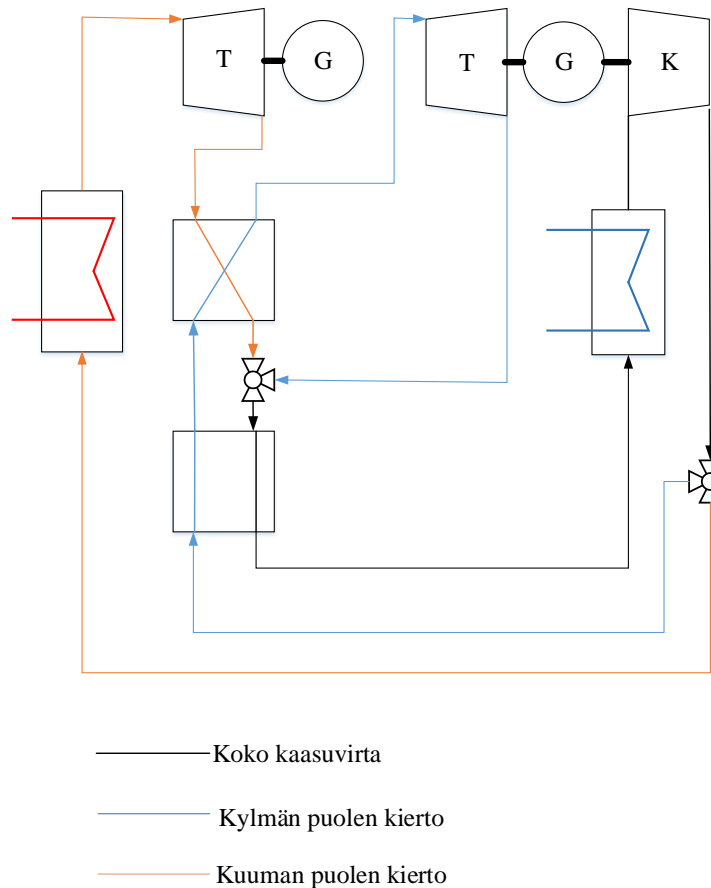
Kylmä kaasu johdetaan kompressorisiin (1), jossa paine nousee. Paineistettu kaasu (2) esilämmitetään rekuperäätorissa, jossa turbiinista ulos tuleva kaasu (5) luovuttaa lämpöenergiaa kompressorista tulevalle kylmemmälle kaasulle. Prosessiin tuodaan lämpöä pisteiden 3 ja 4 välillä. Kuuma, korkeapaineinen kaasu johdetaan turbiiniin, jossa se paisuu. Kiertoaaine luovuttaa lämpöenergiaa jäähdyttimessä rekuperäätorin jälkeen (6) ja kylmä kaasu johdetaan jälleen kompressorisiin.

Kun kaasun kriittinen lämpötila on tarpeeksi alhainen, saavutetaan kiertoprosessissa helposti kriittinen tila, jolloin lämmönsiirto lämmönlähteen ja kiertoaineen välillä tehostuu. Kriittinen lämpötila ei voi olla kuitenkaan liian alhainen, koska lämpönielun alimman mahdollisen lämpötilan määrää ympäristön lämpötila, ellei prosessiin lisätä lämpöpumpulla tapahtuvaa jäähdytystä. Lämpöpumpun käyttö kuitenkin huonontaa prosessin hyötysuhdetta. Hiilidioksidi on hyvä kiertoaaine, koska sen kriittinen lämpötila ei ole liian alhainen, joten lämmön poisto prosessista onnistuu helposti. Kriittinen paine taas on riittävän suuri, jotta prosessin suhteellinen painehäviö pysyy pienenä prosessin toimiessa sopivalla painealueella. (Dostal, Driscoll & Hejzlar 2004, 3.)

Ylikriittinen hiilidioksidi ei ole ideaalikaasu, joten ideaaliselle Brayton-prosessille johdetut yhtälöt eivät päde. Kriittisen pisteen lähellä ja sen yläpuolella (30,98 °C ja 73,8 bar) kaasun ominaisuudet, kuten ominaislämpökapasiteetti ja tiheys, riippuvat hyvin vahvasti lämpötilasta ja paineesta. Hiilidioksidin avulla pyritään parempaan hyötysuhteeseen kuin ilmakiertoisella Brayton-prosessilla pienentämällä kompressorin tekemää työtä. Ideaalikaasulle puristus ja paisunta ovat samankaltaiset, mutta käänteiset prosessit eli kompressorin tekemä työ ja kaasun turbiiniin tekemä työ muuttuvat samalla tavalla paineen ja painesuhteen funktiona. Ideaalikaasun paisuessa turbiinissa kaasun tekemä työ riippuu lähes pelkästään painesuhteesta, ei niinkään sisäänmenopaineesta. Painesuhteen kasvaessa kaasu tekee enemmän työtä. Kriittisen pisteen lähellä hiilidioksidin paisunta on lähes ideaalikaasun kaltainen. Kriittisen pisteen lähellä kompressorin tekemä työ ei muutu samalla tavalla painesuhteen kasvaessa, kuin turbiinissa. Painesuhteen kasvaessa kompressorin tekemä työ kasvaa aluksi hitaammin, kuin kaasun paisuessaan tekemä työ. Koska ideaalikaasun puristus muistuttaa paisuntaa, ylikriittisellä hiilidioksidilla saavutetaan parempi hyötysuhde kompressorin ja turbiinin välillä kuin ideaalikaasulla. (Dostal, Driscoll & Hejzlar 2004, 9–11.)

Ylikriittisen hiilidioksidin käyttö kiertoaineena ei ole täysin ongelmaton. Kaasun ominaislämpökapasiteetti riippuu paineesta ja lämpötilasta ja voi kriittisellä alueella vaihdella voimakkaasti. Ominaislämpökapasiteetti vaikuttaa lämpötilojen muutokseen kattilassa ja esilämmittimessä. Suljetussa Brayton-prosessissa turbiinista tuleva kuuma kaasu voi esilämmittää kiertoaineen rekuperaattorissa ennen lämmöntuontia. Koska ylikriittisen kaasun ominaislämpökapasiteetti vaihtelee voimakkaasti, kylmän ja kuuman fluidin välinen lämpötilaero voi vaihdella rekuperaattorissa niin, että pienin fluidien välinen lämpötilaero saavutetaan jo keskellä lämmönsiirrintä. Ideaalikaasun ollessa kiertoaineena rekuperaattorin suunnitteleminen on helpompaa, koska lämpötilaero on helpompi määritellä. (Dostal, Driscoll & Hejzlar 2004, 12.)

Hukkalämmön hyödyntämiseen on kehitetty erilaisia Brayton-prosesseja, joilla mahdollisimman suuri osa lämmöstä saadaan muutettua sähköksi. Näillä prosesseilla pyritään saamaan lämmönlähteen lämmöstä mahdollisimman suuri osa hyödyksi. Kuvassa 6 on Cascada-kiertoprosessi Davidsonin, Scammelin ja Wrightin (7) mukaan.

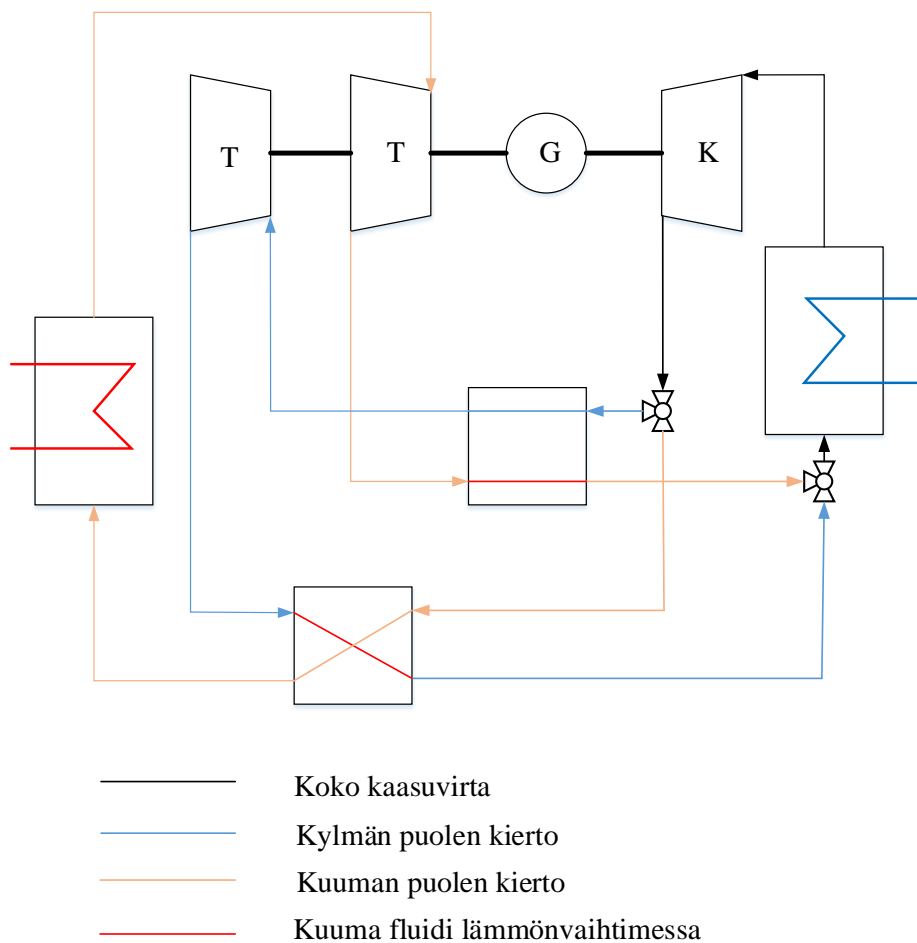


Kuva 6. Cascada-kiertoprosessissa kiertoaine jaetaan kahteen virtaan, joista toiseen tuodaan lämpöä prosessin ulkopuolelta ja toiseen esilämmitysten kautta (Davidson, Scammel & Wright, 7).

Cascada-kiertoprosessissa kaasuvirta jaetaan kompressorin jälkeen kahteen virtaan, kylmään ja kuumaan. Kylmän puolen kaasuvirta lämmitetään vain toisen turbiinin esilämmitysten kautta, minkä jälkeen kaasu paisuu turbiinissa ja yhdistyy toisesta turbiinista tulevaan kuumaan virtaan. Kuuma puoli paineistetusta kaasusta lämmitetään lämmönvaihtimessa, jonka lämmönlähteenä toimii hukkalämpö. Turbiinin jälkeen osa lämmöstä poistetaan kahdessa esilämmittimessä, joiden välissä kaasuvirrat yhdistetään.

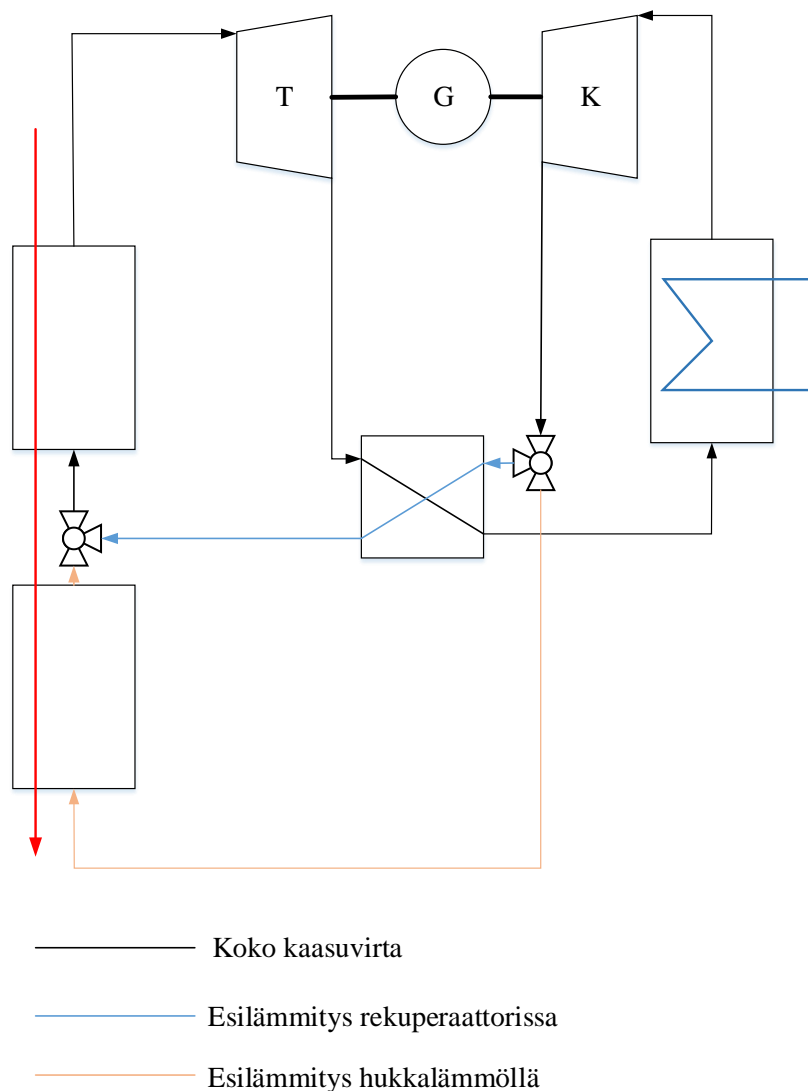
Kuvassa 7 on kahden esilämmittimen suljettu Brayton-prosessi Davidsonin, Scammelin ja Wrightin (8) mukaan. Kahden esilämmittimen suljettu Brayton-prosessi muistuttaa cascada-prosessia, sillä siinäkin on kaksi esilämmittintä ja kaasuvirta jaetaan kahtia. Kylmän puolen kierto, jonka lämmöntuontilämpötila on alhaisempi kuin kuuman puolen, paisuu suoraan rekuperaattorin jälkeen turbiinissa. Paisunnan jälkeen kaasuvirta ohjataan

toiseen rekuperaattoriin, jossa se esilämmittää kuuman puolen kaasuvirran. Kuuman puolen kaasuvirtaan tuodaan lisää lämpöä hukkalämmön avulla. Paisunnan jälkeen kuuman puolen virta esilämmittää kylmäpuolen virran.



Kuva 7. Hukkalämmön hyödyntämisessä voidaan käyttää suljettua Brayton-prosessia, jossa on esilämmitintä turbiinien jälkeen (Davidson, Scammel & Wright, 8).

Kuvassa 8 on suljettu Brayton-prosessi Davidsonin, Scammelin ja Wrightin (9) mukaan.



Kuva 8. Brayton-prosessissa kaasuvirta voidaan jakaa puristuksen jälkeen kahtia, jolloin toinen osa esilämmitetään rekuperaattorissa ja toinen osa matalalämpöisellä hukkalämmöllä (Davidson, Scammel & Wright, 9).

Kaasuvirta jaetaan puristuksen jälkeen kahtia ja toinen virta menee rekuperaattorin ja toinen lämmönvaihtimen kautta. Kaasuvirrat yhdistetään esilämmitysten jälkeen ja prosessiin siirretään lisää lämpöä lämmönvaihtimen kautta. Turbiinin jälkeen koko kaasuvirta jäädytetään ensin rekuperaattorissa. Rekuperaattorin jälkeen lämpönielu poistaa prosessista lämpöä ennen puristusta.

Hukkalämpöä hyödyntävissä Brayton-prosesseissa, joissa kiertoaineena on ylikriittinen hiilidioksidi, kiertoaine jaetaan useampaan virtaan. Näin saadaan lämmönlähteestä mahdollisimman suuri osa lämmöstä siirrettyä prosessiin. (Davidson, Scammel & Wright, 4.) Kaasuvirran jakaminen voi helpottaa myös lämmönvaihtimien suunnittelua, koska

venttiilien avulla voidaan säädellä eri lämmönvaihtimiin menevää massavirtaa. Kriittisellä alueella kaasuvirtojen lämpötilanmuutosta lämmönvaihtimissa ei välttämättä tiedetä tarkasti, joten prosessia voi olla helpompi ajaa niin, että kaasuvirtoja muutetaan halutun lämmönsiirron saamiseksi.

Davidsonin, Scammelin ja Wrightin (15) tutkimuksessa hukkalämmön hyödyntämiseen suunnitelluilla Brayton-prosesseilla saavutetaan 78,4-85,6 % hyötysuhde lämmönlähteestä prosessiin siirtyvälle lämmölle. Tavallisella suljetulla Brayton-prosessilla vastaava hyötysuhde oli vain 61,2 %. Laskelmissa käytettiin samoja lähtöarvoja kompressorin lämpötiloille ja paineille, sekä komponenttien hyötysuhteille. (Davidson, Scammel & Wright, 15.)

3 TEKNIKOIDEN EROAVAISUUDET

Tässä osiossa määritellään prosesseille sopivat lämmönlähteen lämpötilat ja tehotasot. Kustannuksia ja prosessien kaupallisuutta arvioidaan lähteiden perusteella.

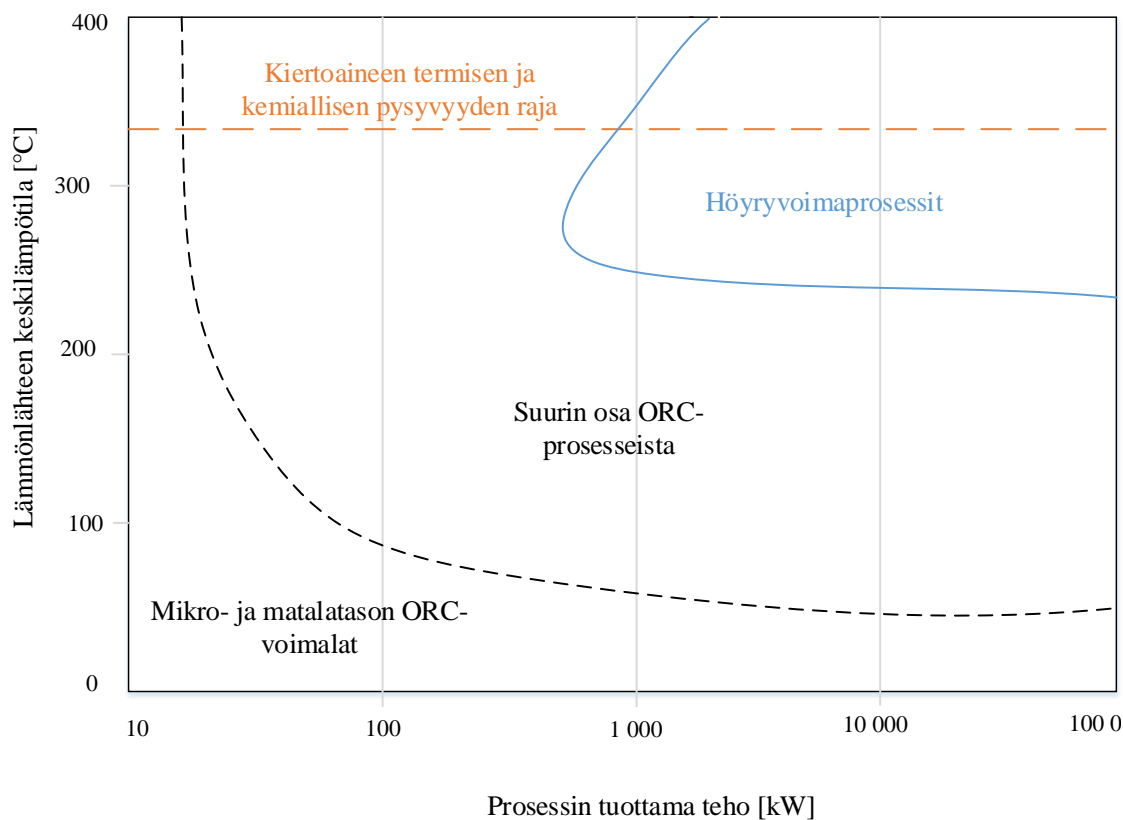
3.1 Teho- ja lämpötilatasot

Taulukossa 2 on prosessien lämpötila- ja tehotasoja. Lämpötilat ovat lämmönlähteen keskilämpötiloja ja tehotaso kuvaa prosessista saatavaa tehoa. Taulukon lähteet ovat liitteessä 1. Kaikki taulukon arvot ovat arvioita, eivätkä absoluuttisia raja-arvoja prosessien toiminnalle. Esimerkiksi ORC-prosessi saadaan toimimaan hyvinkin pienillä tehotasoilla. Davidson, Scammel ja Wright (2) arvioivat julkaisussaan, että ensimmäinen kaupallinen sovellus ylikriittisestä hiilidioksidi-Braytonista tulee olemaan kokoluokkaa 5-20 MW, koska prosessi soveltuu keskisuurien kaasuturbiinien tai sementti- tai terästeollisuuden hukkalämmön hyödyntämiseen. Taulukon 2 tehotaso on siis arvio siitä, mille tehotasolle prosessi voisi soveltua hyvin.

Taulukko 2. Prosessien tehotasot kuvaavat prosessista saatavaa tehoa ja lämpötilatasot ovat prosessin maksimilämpötiloja.

Prosessi	Tehotaso	Lämpötilataso
ORC	< 10 kW – > 50 MW	< 100–400 °C
Kalina	< 10 MW	200–400 °C
sCO ₂ -CBC	5–20 MW	450–750 °C

Kuva 9 (Gaia 2012, 11) kuvaa ORC-prosessille tyypillistä lämmönlähteen lämpötilaa ja prosessista saatavaa tehoa. Jos lämmönlähteen lämpötila on liian suuri, kiertoaine ei enää välttämättä ole termisesti ja kemiallisesti stabiili. Höyryvoimaprosessi on ORC-prosessia kannattavampi vaihtoehto, jos lämmönlähteen lämpötila on korkea ja prosessista saadaan suuri teho. Suurilla tehotasoilla, mutta pienillä lämpötiloilla ORC on parempi vaihtoehto. Taulukon 2 ORC:lle sopiva tehotaso on arvioitu Lemortin ja Quoilin (2009, 5) tekemän taulukon mukaan, johon he ovat koonneet eri valmistajien ORC-voimaloiden tehoja. Taulukon 2 tehot annetaan hyvin karkeasti, koska ORC-prosessista saatavalle teholle ei ole kirjallisuudesta löydettävissä absoluuttisia ylä- ja alarajoja. Lemortin ja Quoilin (2009, 5) taulukossa pienin ORC-voimala tuottaa 6 kW sähkö ja suurin 72 MW.

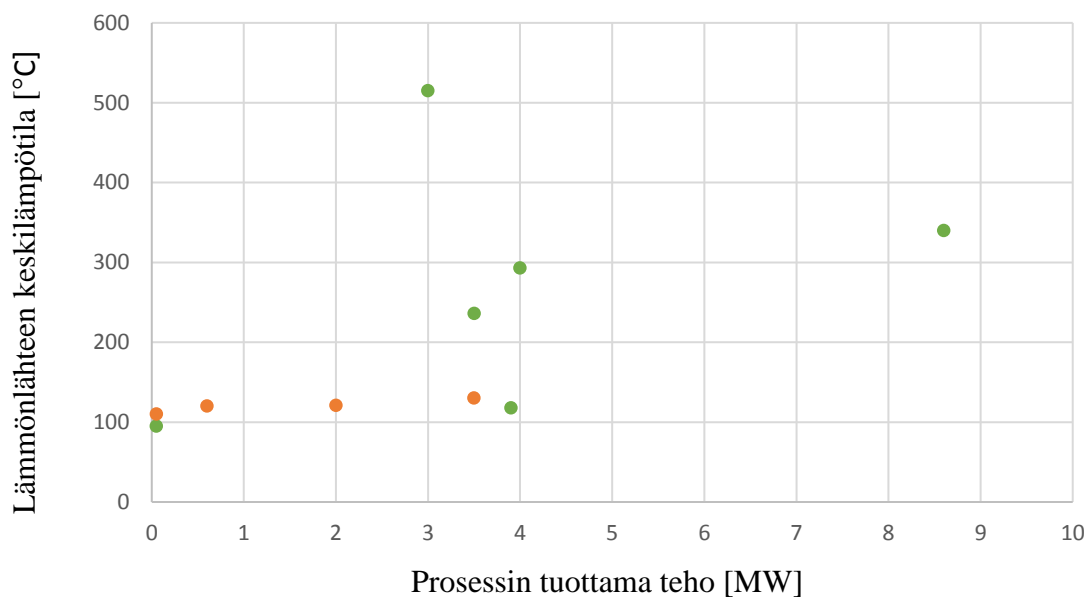


Kuva 9. Gaian (2012, 11) julkaisusta lainattu kuvaaja kuvaa ORC-prosessien sijoittumista lämmönlähteen keskilämpötilan ja prosessista saatavan tehon mukaan.

Global Cement (2012) on kerännyt artikkeliinsa hukkalämpöä ja geotermistä lämpöä hyödyntäviä laitoksia. Lämpötilat taulukossa 3 ja kuvassa 10 ovat lämmönlähteen keskilämpötiloja. Kuvassa 10 hukkalämpöä hyödyntävät laitokset ovat vihreitä ja geotermistä energiaa hyödyntävät laitokset oransseja.

Taulukko 3. Vuonna 2012 oli toiminnassa, toiminnasta poistettuja tai rakenteilla 11 hukkalämpöä tai geotermistä lämpöä hyödyntävää Kalina-voimalaa (Global Cement 2012).

	Teho [MW]	Lämpötila [°C]
Canoga Park	3	515
Fukuoka	4	293
Sumimoto Metals	3,5	236
Husavik	2	121
Fuji Oil	3,9	118
Bruschal	0,6	120
Unterhaching	3,5	130
Shanghai Expo	0,05	95
Quingshui	0,05	110
Khaipur Cement	8,6	340
Star Cement Company	4,75	...



Kuva 10. Taulukon 3 laitosten lämmönlähde on joko geoterminalinen (oranssi) tai hukkalämpö (vihreä) (Global Cement 2012).

Global Cementin (2012) artikkelin mukaan Canoga Parkin ydinvoiman ja kaasuturbiinin hukkalämpöä hyödyntävä Kalina-voimalaitos oli toiminnassa vuosina 1992–1997. Kalina-voimala toimi hyvin, mutta ongelmaksi muodostui nikkeli-pitoinen materiaali laitoksen komponenteissa. (Global Cement 201). Murugan ja Subbaraon (2008, 2) mukaan Kalina-prosessin maksimilämpötilan pitää olla alle 400 °C tai ammoniakista tulee

epästabiilia. Canoga Parkin voimalaitos oli ensimmäinen suuren kokoluokan Kalina-voimala (Global Cement 2012), joten ammoniakkin ominaisuuksista kiertoaineena ei vielä ollut tarkkaa tietoa. Kuvasta 10 nähdään, että muut kaupalliset Kalina-prosessit toimivat alle 400 °C lämpötilatasolla. Kuten taulukossa 2 esitetään, Kalina-prosessin hyödyntämä hukkalämpö on yleensä lämpötila-alueella 200–400 °C (He, Zhang & Zhang 2012, 5). Kalina-prosessia voidaan käyttää myös matalampien lämpötilatasojen hyödyntämiseen. Alhaisimmilla lämpötiloilla on ongelmana, että osa kiertoaineen vedestä voi jäädä nestefaasiin höyrystimen jälkeen, jolloin nesteen ja höyryn erottimessa pitää poistaa suurempi osa kiertoaineen massavirrasta. Kun höyryvirta turbiinin läpi pienenee, prosessista saatava teho jää alhaisemmaksi, kuin jos kaikki kiertoaine höyrystyisi.

3.2 Saatavuus ja kustannukset

Ylikriittistä hiilidioksidia kiertoaineena käyttäviä suljettuja Brayton-prosesseja ei ole vielä kaupallisessa käytössä. Crespi et al. (2017, 3) mukaan 2000-luvulla herännyt kiinnostus ylikriittistä hiilidioksidia kiertoaineena käyttäviä prosesseja kohtaan on noussut. Useat tutkijat ovat julkaisseet tutkimuksia aiheeseen liittyen. Mikro- (<500 kW) ja miniluokan (<1 MW) testilaitoksia on pystytetty useita. (Crespi et al. 2017, 3). Kahden vuoden välein kokoontuvassa Supercritical CO₂ Power Cycles –konferenssissa pidetyssä esityksessä Musgrove, Rimpel ja Wilkes (2015, 110) arvioivat, että keskikokoinen 10 MW testilaitos auttaisi kaupallistamaan ylikriittistä hiilidioksidia käyttävän Brayton- tai Rankine-prosessin. Muuta tutkimusta tarvitaan liittyen voimalaitoksen materiaaleihin ja hiilidioksidin ominaisuuksiin kiertoaineena. (Musgrove, Rimpel & Wilkes 2015, 110.)

Campana et al. (2013, 6) arvioi, että Euroopan terästeollisuuslaitokset voisivat säästää jopa 344-551 miljardia euroa vuosittain sähkönkulutuksessaan, jos laitoksiin asennettaisiin hukkalämmöstä sähköä tuottava ORC-voimalaitos. Campana et al. (2013) perustaa arvionsa siihen, että ORC-voimalan investointi maksaa 3 miljoonaa euroa asennettua MW kohti. ORC-voimalaitoksissa kustannuksia nostaa kiertoaine, jonka hankkiminen on hankalaa verrattuna veteen. Tavalliseen höyryvoimaproessiin verrattuna ORC-prosessin kustannuksia kuitenkin laskee pienempi painetaso. Kun prosessin paine pysyy alhaisempana, laitoksen rakennus- ja kunnossapitokustannukset laskevat. Laitoksen osiin kohdistuu pienempi rasitus, paineen ollessa alhaisempi. (Lemort & Quoilin 2009, 2.)

Tällä hetkellä suurin osa kaupallisista ORC-voimalaitoksista on tehotasoltaan keskisuuria. Mitä suurempi ORC-voimalan tehotaso on, sitä pienempää lämmönlähteen lämpötilaa voidaan hyödyntää. (Gaia, 11.) Ensimmäinen kaupallinen ORC-voimala rakennettiin Kongon demokraattiseen tasavaltaan vuonna 1952. Se tuotti 200 kW sähköä ja käytti lämmönlähteenä 91 asteista geotermistä vettä. Vuosina 1995-2015 on otettu käyttöön useita ORC-voimaloita, jotka käyttävät lämmönlähteenä hukkalämpöä. Voimaloiden tehotasot vaihtelevat 30 kW:sta 17 MW:iin. Maksimilämpötila näissä voimaloissa vaihtelee 130–250 °C. (Colonna et al. 2015, 4–7.)

Kalina-prosesseja on asennettu kaupalliseen käyttöön, kuten Global Cementin (2012) artikkelista käy ilmi. Kalina-voimalaitoksen investointikustannusta nostaa laitoksen monimutkainen rakenne. Ammoniakkia on paremmin saatavilla kuin monia ORC-prosessin kiertoaineita (He, Zhang & Zhang 2012, 7), joten kiertoaineen aiheuttamat kunnossapito kustannukset voivat olla pienemmät kuin ORC-prosessin. Parempi termien hyötysuhde alhaisilla lämpötiloilla ORC-prosessiin verrattuna, kuten Fallahin (2015, 2) julkaisusta käy ilmi, voi nostaa sähköntuotannosta saatuja säästöjä varsinkin sellaisissa maissa, joissa sähkön hinta on korkea.

4 JOHTOPÄÄTÖKSET JA YHTEENVETO

ORC- ja Kalina-prosessit ovat molemmat Rankine-prosesseja, joissa on veden sijasta jokin muu kiertoaaine. Suurin ero ORC- ja Kalina-prosessin välillä on se, että ORC-prosessissa kiertoaaine koostuu yhdestä aineesta ja Kalina-prosessissa kahdesta. Yhden aineen höyrystyminen ja lauhtuminen ovat isotermisiä prosesseja vakioaineessa, kun taas ammoniakki-vesiseoksen lämpötila muuttuu ammoniakkin höyrystyessä ja seoksen konsentraatioiden muuttuessa. Kahdesta fluidista koostuvan kiertoaineen lämpötila pysyy lähellä lämmönlähteen lämpötilaa koko lämmöntuonnin ajan.

Suljettu Brayton-prosessi, jossa kiertoaineena on ylikriittinen hiilidioksidi, saavuttaa höyryvoimaprozessia paremman hyötysuhteen, kun turbiinin sisäänmenolämpötila on yli 500 °C. Hukkalämmön hyödyntämiseen suunnitelluissa suljetuissa Brayton-prosesseissa on yleensä kahteen osaan jaettu kaasuvirta, jonka osavirrat esilämmitetään eri lämpötiloihin. Ylikriittinen hiilidioksidi on toimiva kiertoaaine kaasuturbiiniprozessiin, koska ylikriittisen kaasun puristukseen tarvittava työ ei ole yhtä suuri kuin ideaalikaasun sopivalla painetasolla. Hiilidioksidi sopii ylikriittiseen prozessiin, koska sen kriittinen paine ja lämpötila ovat sopivalla tasolla. Kriittinen lämpötila on riittävän alhainen, jotta kiertoaaine pysyy ylikriittisenä koko prozessin ajan.

Kaikkien työssä esiteltyjen prozessien kustannuksia on vaikea arvioida, koska niistä ei ole saatavilla tarkkaa tietoa. Tässä työssä lähteinä käytetyt julkaisut, joissa vertaillaan Kalina- ja ORC-prosesseja, perustuvat pitkälti teoreettisiin mallinnuksiin. Monissa laskuissa ei ole otettu huomioon prozessien lämpö- tai painehäviöitä, jolloin prozessien hyötysuhteet ovat korkeammat kuin ne todellisuudessa olisivat. Vaikka jollakin prozessilla olisi tietyllä toiminta-alueella korkeampi hyötysuhde, on vaikea arvioida, kumpi prozesseista olisi taloudellisesti kannattavampi. Taloudellista kannattavuutta arvioidessa pitää ottaa huomioon hyötysuhteen lisäksi investoinnin suuruus, laitoksen käyttö- ja kunnossapitokustannukset ja laitoksen rahallinen tuotto. Hukkalämpöä hyödyntävissä prozesseissa on se hyvä puoli, että lämmönlähde voi olla ilmainen ja hukkalämmön hyödyntäminen voi parantaa primääriprozessin hyötysuhdetta, jos hukkalämpöä hyödyntämällä saadaan primääriprozessin lämpönielun lämpötila alhaisemmaksi.

Kalina- ja ORC-prosessit ovat toimivia suunnilleen samoilla lämpötila- ja tehotasoilla, kun taas suljettu Brayton-prosessi, jossa kiertoaineena on ylikriittinen hiilidioksidi, soveltuu korkeampien lämpötilojen hyödyntämiseen. Kalina- ja ORC-prosesseja on asennettu samanlaisiin käyttökohteisiin, kuten teollisuuden hukkalämmön ja geotermisen energian hyödyntämisen mahdollistaviin laitoksiin. Prosessien väliseen valintaan vaikuttaa saatavuus ja hinta, sekä käyttö- ja kunnossapitokustannukset. Käyttö- ja kunnossapitokustannuksia sekä investoinnin suuruutta on vaikea arvioida. ORC-prosessia puoltaa se, että laitoksen rakenne on yksinkertaisempi, prosessia on tutkittu pidempään ja se on ollut markkinoilla pidempään. Kalina-prosessin kiertoaine voi olla helpommin saatavilla, kuin ORC-prosessin ja joissain tutkimuksissa Kalina-prosessin hyötysuhde on laskettu korkeammaksi, kuin ORC-prosessin. Hukkalämmön hyödyntämiseksi suunniteltava prosessi pitää valita tapauskohtaisesti ja juuri siihen käyttötarkoitukseen sopivaksi.

Ylikriittistä hiilidioksidia kiertoaineena käyttävät prosessit, kuten suljettu Brayton-prosessi, eivät ole vielä kaupallistuneet. Testilaitokset ovat pienen, reilusti alle 1 MW, kokoluokan laitoksia, mutta markkinoille tulevien laitosten kokoluokaksi on arvioitu 5-20 MW. Jotta teknologia saadaan markkinoille, tarvitaan suuremman kokoluokan, esimerkiksi 10 MW, testilaitos. Hiilidioksidin käyttäytymistä ylikriittisellä alueella on tutkittu ja siitä on tehty mallinnuksia, mutta kaasun käyttäytymistä ei silti vielä täysin tunneta. Varsinkin tehokkaiden lämmönvaihtimien suunnittelu vaatii kaasun termodynaamisten ominaisuuksien, kuten ominaislämpökapasiteetin, parempaa tuntemista kriittisellä alueella. Hukkalämmön hyödyntämisessä lämmönvaihtimella on tärkeä rooli, koska hukkalämmöstä halutaan hyödyntää mahdollisimman suuri osa.

Kaikki työssä esitellyt prosessit soveltuvat hukkalämmön muuttamiseen sähköksi. Kalina- ja ORC-prosessit toimivat samoilla lämpötilatasoilla, joten niitä voidaan hyödyntää samoissa käyttökohteissa. Suljettu Brayton-prosessi ylikriittisellä hiilidioksidilla on korkeammalle lämpötila- ja tehotasolle soveltuva tekniikka, joka on vasta kehitysasteella.

LÄHDELUETTELO

Bae, Seong Jun et al. 2014. Various supercritical carbon dioxide cycle layouts study for molten carbonate fuel cell application. Elsevier. [verkkojulkaisu]. [viitattu 17.3.2017]. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775314011756>

Campana, F. et al. 2013. ORC waste heat recovery in European energy intensive industries: Energy and GHG savings. Elsevier. [verkkojulkaisu]. [viitattu 16.3.2017]. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890413004123>

Cho, Junhyun et al. 2015. Development of the turbomachinery for the supercritical carbon dioxide power cycle. [verkkojulkaisu]. [viitattu 25.3.2017]. Saatavissa: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/er.3453/epdf>

Colonna, Piero et al. 2015. Organic Rankine Cycle Power Systems: From the Concept to Current Technology, Applications, and an Outlook to the Future. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. 19 s.

Crespi, Francesco et al. 2017. Supercritical carbon dioxide cycles for power generation: A review. Elsevier. [verkkojulkaisu]. [viitattu 23.3.2017]. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261917301915>

Davidson, Chal S. Scammel, William O. Wright, Steven A. Thermo-Economic Analysis of Four sCO₂ Waste Heat Recovery Power Systems. . [verkkojulkaisu]. [viitattu 21.3.2017]. Saatavissa: <http://www.swri.org/4org/d18/sCO2/papers2016/SystemModeling/059paper.pdf>

Dostal v. Driscoll M.J., Hejzlar J., 2004. A Supercritical Carbon Dioxide Cycle for Next Generation Nuclear Reactors. Advanced Nuclear Power Technology Program. s. 326. Saatavissa: <http://web.mit.edu/22.33/www/dostal.pdf>

Euroopan Unioni, 2017. Energia [verkkosivu]. [päivitetty 8.3.2017]. [viitattu 9.3.2017]. Saatavissa: https://europa.eu/european-union/topics/energy_fi

Fallah M. et al. 2015. Advanced exergy analysis of the Kalina cycle applied for low temperature enhanced geothermal system. Iran: Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz. Elsevier. [verkkojulkaisu]. [viitattu 14.3.2017]. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890415010304>

Gaia, Mario. 30 Years of Organic Rankine Cycle Development. First International Seminar of ORC Power Systems. [verkkojulkaisu]. [viitattu 15.3.2017]. Saatavissa: <http://orc2011.fyper.com/uploads/File/presentations3/30%20Years%20of%20ORC%20development.pdf>

Global Cement. 2012. Kalina cycle power systems in waste heat recovery applications. [verkkojulkaisu]. [viitattu 17.3.2017]. Saatavissa: <http://www.globalcement.com/magazine/articles/721-kalina-cycle-power-systems-in-waste-heat-recovery-applications>

He Maogang, Zhang Xinxin, Zhang Ying, 2012. A review of research on the Kalina cycle. Elsevier. [verkkojulkaisu]. [viitattu 10.3.2017]. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032112003747>

Heinimö, Jussi. Jäppinen, Eero. 2005. ORC-teknologia hajautetussa sähköntuotannossa. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 84 s. ISBN: 952-214-014-7

Iverson Brian D. et al., 2013. Supercritical CO₂ Brayton cycle for solar-thermal energy. Elsevier. [verkkojulkaisu]. [viitattu 9.3.2017]. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261913005278>

Lemmort, Vincent. Quoilin, Sylvain. 2009. Technological and Economical Survey of Organic Rankine Cycle Systems. Belgium: University of Liège. 12 s.

Macwan, Sunil. 2013. The Kalina cycle. A Major Breakthrough in Efficient Heat to Power Generation. [verkkojulkaisu]. [viitattu 26.4.2017]. Saatavissa: http://www.heatispower.org/wp-content/uploads/2013/11/Recurrent-Eng-macwan_chp-whp2013.pdf

Minea Vasile, 2014. Power generation with ORC machines using low-grade waste heat or renewable energy. Elsevier. [verkkojulkaisu]. [viitattu 9.3.2017]. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431114003184>

Motiva, 2014. Tuotannon hukkalämpö hyödyksi [verkkojulkaisu]. [viitattu 9.3.2017]. Saatavissa: http://www.motiva.fi/files/8501/Tuotannon_hukkalampo_hyodyksi.pdf

Murugan, R. Senthil. Subbarao, P. M. V. 2008. Thermodynamic Analysis of Rankine-Kalina Combined Cycle. New Delhi: Indian Institute of Technology Delhi. [verkkojulkaisu]. [viitattu 26.4.2017]. Saatavissa: <http://dergipark.ulakbim.gov.tr/eogujt/article/view/1034000221/1034000205>

Musgrove, Grant. Rimpel, Aaron M. Wilkes, Jason C. 2016. Fundamentals of Supercritical CO₂. [verkkojulkaisu]. [viitattu 23.3.2017]. Saatavissa: <http://www.swri.org/4org/d18/sco2/papers2016/Tutorials/Industrial.pdf>

Saffari Hamid et al., 2015. Thermodynamic analysis and optimization of a geothermal Kalina cycle system using Artificial Bee Colony algorithm. Elsevier. [verkkojulkaisu]. [viitattu 9.3.2017]. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148115305036>

Tartiére Thomas. 2016. ORC Market: A World Overview. ORC World Map. [verkkojulkaisu]. [viitattu 10.4.2017]. Saatavissa: http://orc-world-map.org/analysis.html#current_situation

The Engineering Toolbox. Water – Thermodynamic Properties. [verkkojulkaisu]. [viitattu 26.4.2017]. Saatavissa: http://www.engineeringtoolbox.com/water-thermal-properties-d_162.html

Victor, Rachel Anne. Kim, Jin-Kuk. Smith, Robin. 2013. Composition optimization of working fluids for Organic Rankine Cycles and Kalina Cycles. [verkkojulkaisu]. [viitattu 23.3.2017]. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036054421300265>

Yari M. et al. 2015. Exergoeconomic comparison of TLC (trilateral Rankine cycle), ORC (Organic Rankine cycle) and Kalina cycle using a low grade heat source. Elsevier. [verkkojulkaisu]. [viitattu 14.3.2017]. Saatavissa:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544215002352>

Liite I

Prosessi	Tehotaso	Lämpötilataso	Lähde
ORC	n. 10 kW- 10MW	alle 100 °C:sta yli 300 °C	Gaia, 11
Kalina	< 10 MW	200-400 °C	Global cement 2012; Waste heat recovery for the Cement sector, 13; He, Zhang & Zhang 2012, 5
CO ₂ - Brayton	5-20 MW	450-750 °C	Bae et al. 2014; Wright, Davidson & Scammell, 2